



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 101408359 B

(45) 授权公告日 2011. 01. 26

(21) 申请号 200810159583. 7

审查员 刘璇斐

(22) 申请日 2008. 11. 28

(73) 专利权人 山东建筑大学

地址 250101 山东省济南市临港开发区凤鸣路

(72) 发明人 方肇洪 刘俊红

(74) 专利代理机构 济南圣达专利商标事务有限公司 37221

代理人 张勇

(51) Int. Cl.

F25B 30/06 (2006. 01)

F24J 3/08 (2006. 01)

G06F 17/50 (2006. 01)

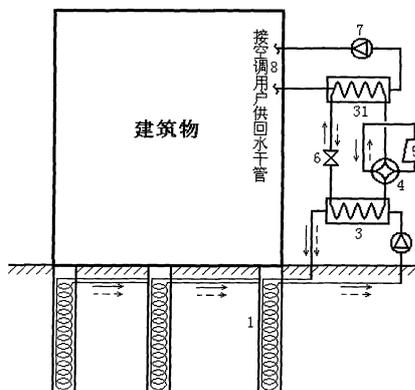
权利要求书 3 页 说明书 10 页 附图 1 页

(54) 发明名称

桩埋螺旋管式地源热泵系统的地热换热器的传热方法

(57) 摘要

本发明公开了一种桩埋螺旋管式地源热泵系统及其地热换热器的传热模型。它首次提出实心圆柱面热源模型,用格林函数法求出了该传热模型的两个解析解表达式。本发明可充分利用建筑物地下面积,省去大量钻孔和埋管费用,降低地源热泵系统的初投资,提高了施工效率,施工方便快捷。此外所建立的桩埋螺旋管地热换热器的传热模型,可以对桩埋螺旋管地热换热器的各参数对其传热能力影响进行定量分析,并为工程设计提供了依据。其结构为:它包括地热换热器,地热换热器通过管路与空调热泵系统连接,空调热泵系统则与向建筑物内的输送和末端系统连接,所述地热换热器有多个,每个地热换热器由建筑物桩基和埋设在桩基内的螺旋管组成桩埋螺旋管式地热换热器。



1. 一种桩埋螺旋管式地源热泵系统的地热换热器的传热方法,其特征是,桩埋螺旋管地热换热器的传热模型采用实心圆柱面热源模型,其数学描述为:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \theta}{\partial \tau} &= a \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta}{\partial r} \right) + \frac{q_1 \delta(r-r_0)}{2\pi r_0 \rho c} & 0 < r < \infty, \tau > 0 \\ \theta &= 0 & 0 < r < \infty, \tau = 0 \\ \frac{\partial \theta}{\partial r} &= 0 & r = 0, \tau > 0 \\ \theta &= 0 & r \rightarrow \infty, \tau > 0 \end{aligned} \right\}$$

式中

θ 是过余温度, $^{\circ}\text{C}$;

$\theta = t - t_w$;

t 是介质中的实际温度, $^{\circ}\text{C}$;

t_w 是介质的初始温度, $^{\circ}\text{C}$;

a 为介质的热扩散率, m^2/s ;

r 为空间点的径向坐标, m ;

r_0 为圆柱面热源(螺旋管)半径, m ;

τ 为时间, s ;

q_1 为热流密度,表示每米深度桩的换热量, W/m ;

ρ 为桩基均匀介质的密度, kg/m^3 ;

c 为桩基均匀介质的比热, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$;

$\delta(r-r_0)$ 为 Dirac- δ 函数,有 $\int_{-\infty}^{\infty} \delta(r-r_0) = 1$ 。

2. 如权利要求 1 所述的桩埋螺旋管式地源热泵系统的地热换热器的传热方法,其特征是,通过格林函数法求解,把圆柱面热源看作是沿圆周方向排列的无数线热源的集合时,得到的圆柱面热源在离轴心距离为 r 的点引起的无量纲温度响应为:

$$\Theta(R, Fo) = -\frac{1}{4\pi^2} \int_0^\pi \text{Ei} \left(-\frac{R^2 + 1 - 2R \cos \varphi}{4Fo} \right) d\varphi$$

式中

无量纲温度 $\Theta = \lambda \theta / q_1$,

λ 是介质的导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$;

θ 是过余温度, $^{\circ}\text{C}$;

q_1 为热流密度, W/m ;

$R = r/r_0$ 为无量纲半径;

r 为空间点的径向坐标, m ;

r_0 为圆柱面热源(螺旋管)半径, m ;

傅立叶数 $Fo = a\tau/r_0^2$ 为无量纲时间,

a 为介质的热扩散率, m^2/s ;

τ 为时间, s ;

$\text{Ei}(x)$ 为自变量 x 的指数积分函数,其表达式为:

$$\text{Ei}(x) = \int_{-\infty}^x \frac{e^u}{u} du = \gamma + \ln(-x) + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{x^k}{k!k}, -\infty < x < 0$$

式中

u 表示积分变量,

欧拉常数 $\gamma \approx 0.577216$;

x 表示积分函数的自变量,

k 为级数表达式中的项数,当 $x > 0$ 时,定义 $\text{Ei}(x) = 0$ 。

3. 如权利要求 1 所述的桩埋螺旋管式地源热泵系统的地热换热器的传热方法,其特征是,通过格林函数法求解,当把圆柱面热源看作是沿圆周方向排列的无数线热源的集合时,得到的热源 ($r = r_0$) 处的温升为:

$$\Theta_0 = -\frac{1}{4\pi^2} \int_0^\pi \text{Ei}\left(-\frac{1-\cos\varphi}{2Fo}\right) d\varphi$$

$$= F(Fo)$$

其中,

Fo 为傅立叶数;

$\Theta_0 = \Theta(1, Fo) = \lambda \theta(r_0, \tau) / q_1$ 是热源表面的无量纲温升;

λ 是介质的导热系数, $W/(m \cdot K)$;

r_0 为圆柱面热源(螺旋管)半径, m;

φ 是柱坐标中的坐标参数,极角, rad(弧度),在公式中起积分变量的作用。

θ 是过余温度, $^{\circ}C$;

q_1 为热流密度, W/m 。

4. 如权利要求 1 所述的桩埋螺旋管式地源热泵系统的地热换热器的传热方法,其特征是,通过格林函数法求解,当把一维实心圆柱面热源看作是沿高度方向排列的无数圆环形线热源的集合时,得到的圆柱面热源在离轴心距离为 r 的点引起的无量纲温度响应为:

$$\Theta(R, Fo) = \frac{1}{8\pi^{2/3}} \int_0^{Fo} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{(Fo - Fo')^{3/2}} \exp\left[-\frac{R^2 + 1 + Z'^2}{4(Fo - Fo')}\right] I_0\left[\frac{R}{2(Fo - Fo')}\right] dZ' dFo'$$

式中加上标的参数表示热源处的参数, $I_0(x)$ 是零阶变形贝塞尔函数,且有

$$I_0(x) = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \exp(x \cos \theta) d\theta,$$

Fo 为傅立叶数,

R 为定义的无量纲半径,

Fo' 为瞬时热源作用的时刻表示的傅立叶数;

Z' 为圆环形线热源在纵向的无量纲坐标,其定义为 $Z' = z' / r_0$,

Fo' 和 Z' 在上式中都是作为积分变量。

5. 如权利要求 1 所述的桩埋螺旋管式地源热泵系统的地热换热器的传热方法,其特征是,通过格林函数法求解,当把一维实心圆柱面热源看作是沿高度方向排列的无数圆环形线热源的集合时,得到的热源 ($r = r_0$) 处的温升为:

$$\Theta_0 = \frac{1}{8\pi^{2/3}} \int_0^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{(F_0 - F_0')^{3/2}} \exp\left[-\frac{2 + Z'^2}{4(F_0 - F_0')}\right] I_0\left[\frac{1}{2(F_0 - F_0')}\right] dZ' dF_0' .$$

桩埋螺旋管式地源热泵系统的地热换热器的传热方法

技术领域：

[0001] 本发明涉及的是一种在桩基中埋设螺旋管作为地热换热器的桩埋螺旋管式地源热泵系统及其地热换热器的传热模型,属于建筑环境与设备工程、制冷工程技术及相关传热领域。

[0002] 背景技术：

[0003] 地源热泵系统是一种利用地下浅层地热资源(包括地下水、地下岩土或地表水等),既可供热又可制冷的高效节能装置。其中地埋管地源热泵系统较少受环境条件的限制,因而正日益受到重视。它利用地下土壤温度相对稳定的特性,在投入少量高位能的基础上,通过埋在地下的地埋管地热换热器与大地进行冷热交换,实现夏季制冷、冬季供暖,还可以提供生活用热水,是国家重点推广应用的实现建筑节能减排的新技术。但由于地源热泵空调系统的初投资较高使其应用受到限制,钻孔施工费用居高不下是造成初投资较高的主要原因。

[0004] 针对目前建筑物桩基的使用日益普及,把地埋管与建筑桩基础结合已成为应用地源热泵技术的一个新热点。由于桩基础的深度通常远小于竖直钻孔埋管的深度,在目前国内外不多的已有桩埋管研究应用中,桩基埋管主要采用了四种形式:串联双U型(W型)、单U型、并联双U型和并联三U型。但是,在相对较短的桩中采用单U型管,管的传热面积太少,不能充分发挥桩的作用;W型管易在桩中最高端集气,引起流动的阻塞;并联双U和三U管虽然增加了管在桩中总的传热面积,但是流体单程的行程仍偏短,多个U型管并联设置造成流通截面过大,换热器进出口温差偏小,使换热效果恶化,同时增加了循环水泵的功耗和运行费用。

[0005] 螺旋管具有传热系数比直管的高,在相同空间里可得到更大的传热面积,布置更长的管道,更具有安全性的特性。在地源热泵系统的地埋管换热器中,就有螺旋埋管换热器。螺旋埋管可以增加管与土壤的接触面积,但因其不易施工,主要应用于水平埋管形式。如果将其应用于竖直埋管,需要解决在土壤中盘绕时管间距不易确定的困难,因此目前的文献中几乎查不到关于竖直螺旋埋管的资料。但如果将竖直螺旋管与桩基结合,则很容易解决施工上的困难,实施方式可以是将螺旋盘管固定在建筑物地基的预制空心钢筋笼中,然后随钢筋笼一起下到桩井中,再浇注混凝土。因此提出在桩基(预制管桩、灌注桩、地下连续墙)中埋设螺旋管的地源热泵系统,即桩埋螺旋管式地源热泵系统。该系统在桩径大或桩的数量多时可能完全满足建筑物的需要,当桩埋螺旋管地热换热器不足以承担全部建筑空调负荷时,不足部分可采用钻孔竖直埋管,或者采用其他冷热源来补充,这可以通过设计来解决。

[0006] 和其他埋管方式相比,桩埋螺旋管式地源热泵系统充分利用建筑物的地下面积,通过桩基与周围大地形成换热,省去大量的钻孔和埋管费用,并且大大提高施工效率,施工也极为方便快捷,这将为地源热泵系统的应用开辟更为广阔的前景。

[0007] 地热换热器的传热研究一直是地源热泵技术的难点、核心和应用基础。现有的桩基埋管工程中只能依靠试验或经验进行传热的估算。与钻孔相比,桩基础的体量大,其径向

尺度和热容量都不能忽略,针对钻孔埋管的传热模型已不再适用。针对桩埋螺旋管换热器的特点,不同于已有的地热换热器线热源模型和空心圆柱面热源模型,本专利提出了实心介质中的圆柱面热源模型。利用该理论模型可以对桩埋螺旋管地热换热器的各参数对其传热能力的影响进行定量的分析,并为工程设计提供了依据。

[0008] 在已有的专利中,如 200610017286. X 《保温式多组管状换热器地能转换预应力混凝土管桩》,仅简单叙述在采用的预应力混凝土管桩管内孔中,直接下置多组 U 型管状换热器或螺旋型盘管换热器,并没有对桩中螺旋盘管做更多的介绍。在 200620028157.6 《螺旋盘管浅层地热转换预成孔灌注型桩》中,虽然将螺旋盘管应用于桩中,但仅针对预成孔灌注型桩,而且没有对地源热泵系统进行详细的描述。另外在已有的桩埋管地源热泵中,都没有提出其桩埋管地热换热器的传热分析方法,这将成为桩埋管的设计和应用的一个重要障碍。

发明内容:

[0009] 本发明的目的就是为了解决已有技术的不足,提供一种具有满足可持续发展和节能减排对制冷空调行业在节能和环保上的要求,且结构简单,使用方便等优点的桩埋螺旋管式地源热泵系统及其地热换热器的传热模型。

[0010] 为实现上述目的,本发明采用如下技术方案:

[0011] 一种桩埋螺旋管式地源热泵系统,它包括地热换热器,地热换热器通过管路与空调热泵系统连接,空调热泵系统则与向建筑物内的输送和末端系统连接,所述地热换热器有多个,每个地热换热器由建筑物桩基和安装在桩基内的螺旋管组成桩埋螺旋管式地热换热器。

[0012] 所述每个螺旋管为单螺旋或双螺旋式盘绕。

[0013] 所述各螺旋管串联或并联。

[0014] 所述空调热泵系统包含至少一个换热器 I 和至少一个换热器 II、至少一台压缩机、至少一个节流装置和至少一个四通换向阀,四通换向阀实现热泵系统冬夏季制冷剂工质流向的转变,从而使所述两个换热器实现相反的冬夏季蒸发器与冷凝器的作用。

[0015] 所述向建筑物内的输送和末端系统由空调热泵系统中的换热器 II、至少一个循环水泵和若干个空调末端用户组成,通过循环水泵将冷量或热量接入空调用户供回水,并由管路带到各空调末端用户。

[0016] 一种桩埋螺旋管式地源热泵系统的地热换热器传热模型,对桩埋螺旋管地热换热器的传热模型采用实心圆柱面热源模型,其数学描述为:

$$\left. \begin{aligned}
 & \frac{\partial \theta}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta}{\partial r} \right) + \frac{q_1 \delta(r-r_0)}{2\pi r_0 \rho c} & 0 < r < \infty, \tau > 0 \\
 & \theta = 0 & 0 < r < \infty, \tau = 0 \\
 & \frac{\partial \theta}{\partial r} = 0 & r = 0, \tau > 0 \\
 & \theta = 0 & r \rightarrow \infty, \tau > 0
 \end{aligned} \right\}$$

[0018] 式中,

[0019] θ 是过余温度, $\theta = t - t_w$, $^{\circ}\text{C}$;

[0020] t 是介质中的实际温度, $^{\circ}\text{C}$;

[0021] t_w 是介质的初始温度, $^{\circ}\text{C}$;

[0022] a 为介质的热扩散率, m^2/s ;

[0023] r 为空间点的径向坐标, 即为离轴心的距离, m ;

[0024] r_0 为圆柱面热源 (螺旋管) 半径, m ;

[0025] τ 为时间, s ;

[0026] q_1 为热流密度, 表示每米深度桩的换热量, W/m ;

[0027] ρ 为桩基均匀介质的密度, kg/m^3 ;

[0028] c 为桩基均匀介质的比热, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$;

[0029] $\delta(r-r_0)$ 为 Dirac- δ 函数, 有 $\int_{-\infty}^{\infty} \delta(r-r_0) = 1$ 。

[0030] 通过格林函数法求解, 把圆柱面热源看作是沿圆周方向排列的无数线热源的集合时, 得到的圆柱面热源在离轴心距离为 r 的点引起的无量纲温度响应为:

[0031]

$$\Theta(R, Fo) = -\frac{1}{4\pi^2} \int_0^{\pi} \text{Ei} \left(-\frac{R^2 + 1 - 2R \cos \varphi}{4Fo} \right) d\varphi$$

[0032] 式中,

[0033] $\Theta = \lambda \theta / q_1$ 为无量纲温度;

[0034] λ 是介质的导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$;

[0035] θ 是过余温度, $^{\circ}\text{C}$;

[0036] q_1 为热流密度, W/m ;

[0037] $R = r/r_0$ 为无量纲半径;

[0038] $Fo = a\tau/r_0^2$ 为傅立叶数表征无量纲时间,

[0039] r_0 为圆柱面热源 (螺旋管) 半径, m ;

[0040] φ 是柱坐标中的坐标参数, 极角, rad (弧度), 在公式中起积分变量的作用。

[0041] $\text{Ei}(x)$ 为自变量 x 的指数积分函数, 其表达式为:

$$\text{Ei}(x) = \int_{-\infty}^x \frac{e^u}{u} du = \gamma + \ln(-x) + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{x^k}{k!k}, \quad -\infty < x < 0$$

[0043] 式中,

[0044] u 表示积分变量,

[0045] 欧拉常数 $\gamma \approx 0.577216$;

[0046] x 表示积分函数的自变量,

[0047] k 为级数表达式中的项数。

[0048] 当 $x > 0$ 时, 定义 $\text{Ei}(x) = 0$ 。

[0049] 通过格林函数法求解, 当把圆柱面热源看作是沿圆周方向排列的无数线热源的集合时, 得到的热源 ($r = r_0$) 处的温升为:

[0050]

$$\Theta_0 = -\frac{1}{4\pi^2} \int_0^{\pi} \text{Ei} \left(-\frac{1 - \cos \varphi}{2Fo} \right) d\varphi$$

[0051] $= F(Fo)$

[0052] 式中,

[0053] F_o 为傅立叶数,

[0054] $\Theta_0 = \Theta(1, F_o) = \lambda \theta(r_0, \tau) / q_1$ 是热源表面的无量纲温升,

[0055] λ 是介质的导热系数, $W / (m \cdot K)$;

[0056] θ 是过余温度, $^{\circ}C$

[0057] r_0 为圆柱面热源 (螺旋管) 半径, m ;

[0058] τ 为时间, s ;

[0059] q_1 为热流密度, W / m ;

[0060] φ 是柱坐标中的坐标参数, 极角, rad (弧度), 在公式中起积分变量的作用。

[0061] 通过格林函数法求解, 当把一维实心圆柱面热源看作是沿高度方向排列的无数圆环形线热源的集合时, 得到的圆柱面热源在离轴心距离为 r 的点引起的无量纲温度响应为:

$$[0062] \quad \Theta(R, F_o) = \frac{1}{8\pi^{2/3}} \int_0^{F_o} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{(F_o - F_o')^{3/2}} \exp\left[-\frac{R^2 + 1 + Z'^2}{4(F_o - F_o')}\right] I_0\left[\frac{R}{2(F_o - F_o')}\right] dZ' dF_o'$$

[0063] 式中,

[0064] $I_0(x)$ 是零阶变形贝塞尔函数, 且有 $I_0(x) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \exp(x \cos \theta) d\theta$,

[0065] F_o 为傅立叶数;

[0066] R 为定义的无量纲半径;

[0067] F_o' 为瞬时热源作用的时刻表示的傅立叶数;

[0068] z' 为圆环形线热源在纵向的无量纲坐标, 其定义为 $Z' = z' / r_0$;

[0069] r_0 为圆柱面热源 (螺旋管) 半径, m ;

[0070] F_o' 和 Z' 在上式中都是作为积分变量。

[0071] 在上式中取 $R = 1$, 得到的热源 ($r = r_0$) 处的无量纲温升 Θ_0 为:

$$[0072] \quad \Theta_0 = \frac{1}{8\pi^{2/3}} \int_0^{F_o} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{(F_o - F_o')^{3/2}} \exp\left[-\frac{2 + Z'^2}{4(F_o - F_o')}\right] I_0\left[\frac{1}{2(F_o - F_o')}\right] dZ' dF_o'$$

[0073] 其中, F_o 、 R 、 F_o' 和 Z' 的定义同上式。

[0074] 本发明桩埋螺旋管式地源热泵系统主要由三部分组成: 桩埋螺旋管式的地热换热器、空调热泵系统、向建筑物内的输送和末端系统。

[0075] 桩埋螺旋管式地热换热器实现管内换热介质与土壤的热交换, 是本发明的重点。在各桩基中埋设的螺旋管可以串联也可以并联, 螺旋管的盘绕方式可以采用单螺旋, 也可以为双螺旋。其实施方式是将螺旋盘管固定在建筑物地基的预制空心钢筋笼中, 然后随钢筋笼一起下到桩井中, 再浇注混凝土。

[0076] 空调热泵系统包含 2 个换热器、压缩机、节流装置和四通换向阀, 四通换向阀实现热泵系统冬夏季制冷剂工质流向的转变, 从而使 2 个换热器实现相反的冬夏季蒸发器与冷凝器的作用。空调热泵系统中冬夏工况的转换也可以采用循环介质机外转换的形式。

[0077] 向建筑物内的输送和末端系统由换热器、循环水泵和空调末端用户组成, 通过循环水泵将冷量 (夏) 或热量 (冬) 接入空调用户供回水, 并由管路带到各空调末端用户。对于一定的建筑物由于可利用的桩基个数有限, 桩基埋管可能只能承担空调系统部分负荷,

因此可能需要部分钻孔埋管地热换热器或采用其他方式作为冷热源补充。

[0078] 地热换热器的研究一直是地源热泵技术的难点,同时也是该项技术研究的核心和应用基础。与钻孔埋管相比,桩基埋管所处的桩基径向尺度和热容量都不能忽略,针对钻孔埋管的传热模型,即线热源模型和(空心)圆柱面热源模型已不再适用,现有的桩基埋管工程中只能依靠试验或经验进行传热的估算。结合桩基螺旋管地热换热器的结构特点,我们提出一个新的地热换热器传热模型,即实心圆柱面热源模型。与线热源模型不同,这里的换热面是有较大尺度的螺旋面,而不是虚拟的线热源。与空心圆柱面热源模型不同,这里圆柱面内部不是空洞,而是有均匀材料填充。因此即使在钻孔埋管换热器中应用时,新模型较上述两种模型也更接近实际的情况,可以达到更高的精度。而对于桩基螺旋管换热器,这一新模型更是提供了传热分析的理论基础。

[0079] 在作为讨论的基础模型中,先考虑一维问题,即忽略深度方向的导热;同时先假定桩基与周围岩土有相同的热物性,即整个区域由均匀的介质组成。把螺旋管的发热简化为一个从 $\tau = 0$ 时刻开始均匀发热的圆柱面热源,其半径为 r_0 。这一问题的数学描述为:

$$\left. \begin{aligned}
 & \frac{\partial \theta}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta}{\partial r} \right) + \frac{q_1 \delta(r-r_0)}{2\pi r_0 \rho c} & 0 < r < \infty, \tau > 0 \\
 [0080] \quad & \theta = 0 & 0 < r < \infty, \tau = 0 \\
 & \frac{\partial \theta}{\partial r} = 0 & r = 0, \tau > 0 \\
 & \theta = 0 & r \rightarrow \infty, \tau > 0
 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

[0081] 式中,

[0082] θ 是过余温度, $^{\circ}\text{C}$

[0083] $\theta = t - t_w$;

[0084] t 是介质中的实际温度, $^{\circ}\text{C}$;

[0085] t_w 是介质的初始温度, $^{\circ}\text{C}$;

[0086] a 为介质的热扩散率, m^2/s ;

[0087] r 为空间点的径向坐标, m ;

[0088] r_0 为圆柱面热源(螺旋管)半径, m ;

[0089] τ 为时间, s ;

[0090] q_1 为热流密度,表示每米深度桩的换热量, W/m ;

[0091] ρ 为桩基均匀介质的密度, kg/m^3 ;

[0092] c 为桩基均匀介质的比热, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$

[0093] $\delta(r-r_0)$ 为 Dirac- δ 函数,有 $\int_{-\infty}^{\infty} \delta(r-r_0) = 1$ 。

[0094] 用格林函数法对方程组(1)直接得出解析解。把圆柱面热源看作是沿圆周方向排列的无数线热源的集合,每个线热源的发热率为 $\frac{q_1}{2\pi} d\varphi$ 。圆柱面热源在离 z 轴轴心距离为 r 的点引起的过余温度为所有线热源在该点产生的过余温度的叠加。则该面热源产生的温度响应为:

[0095]

$$\theta(r, \tau) = -\frac{q_1}{4\pi\lambda_0} \int_0^\pi \frac{1}{\pi} \text{Ei} \left(-\frac{r^2 + r_0^2 - 2rr_0 \cos\varphi}{4a\tau} \right) d\varphi \quad (2)$$

[0096] 其中,

[0097] r_0 为圆柱面热源 (螺旋管) 半径, m;

[0098] r 为空间点的径向坐标, m;

[0099] q_1 为热流密度, 表示每米深度桩的换热量, W/m;

[0100] φ 是柱坐标中的坐标参数, 极角, rad (弧度), 在公式中起积分变量的作用。

[0101] $\text{Ei}(x)$ 为指数积分函数, 其表达式为:

$$\text{Ei}(x) = \int_{-\infty}^x \frac{e^u}{u} du = \gamma + \ln(-x) + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{x^k}{k!k}, \quad -\infty < x < 0$$

[0103] 式中

[0104] u 表示积分变量,

[0105] 欧拉常数 $\gamma \approx 0.577216$,

[0106] x 表示指数积分函数 $\text{Ei}(x)$ 的自变量,

[0107] 当 $x > 0$ 时, 定义 $\text{Ei}(x) = 0$ 。

[0108] 为了分析问题的方便, 省去参数的单位, 定义一些无量纲参数。定义无量纲温度 $\Theta = \lambda \theta / q_1$, λ 是介质的导热系数, W/(m·K)。同时定义无量纲半径 $R = r/r_0$, 无量纲时间傅立叶数 $Fo = a\tau/r_0^2$ 。则上式可以写作:

[0109]

$$\Theta(R, Fo) = -\frac{1}{4\pi^2} \int_0^\pi \text{Ei} \left(-\frac{R^2 + 1 - 2R \cos\varphi}{4Fo} \right) d\varphi \quad (3)$$

[0110] 式中,

[0111] R 为定义的无量纲半径;

[0112] Fo 为傅立叶数;

[0113] φ 是柱坐标中的坐标参数, 极角, rad (弧度), 在公式中起积分变量的作用。。

[0114] 热源 ($r = r_0$) 处的温升为:

[0115]

$$\Theta_0 = -\frac{1}{4\pi^2} \int_0^\pi \text{Ei} \left(-\frac{1 - \cos\varphi}{2Fo} \right) d\varphi \quad (4)$$

$$= F(Fo)$$

[0117] 式中,

[0118] Fo 为傅立叶数;

[0119] φ 是柱坐标中的坐标参数, 极角, rad (弧度), 在公式中起积分变量的作用。

[0120] 也可以把一维实心圆柱面热源看作是沿高度方向排列的无数圆环形线热源的集合, 则每个圆环形线热源的发热率为 $q_1 dz$ 。圆柱面热源在离轴心距离为 r 的点引起的过余温度为所有圆环形线热源在该点产生的过余温度的叠加。在 $z = z'$ 的平面上, 圆心在 z 轴上, 半径为 r_0 的环形线热源 (均匀发热), 在 τ' 时刻的瞬时发热量为 $Q_1 = q_1 dz' d\tau'$ [J], 由格林函数法可得该环形线热源产生的温度响应为:

$$[0121] \quad \theta_1 = \frac{Q_1}{\rho c} \frac{1}{8 \sqrt{\pi a (\tau - \tau')}} \exp \left[-\frac{r^2 + r_0^2 + (z - z')^2}{4a(\tau - \tau')} \right] I_0 \left[\frac{rr_0}{2a(\tau - \tau')} \right] \quad (5)$$

[0122] 其中,

[0123] $I_0(x)$ 是零阶变形贝塞尔函数, 且有 $I_0(x) = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \exp(x \cos \theta) d\theta$,

[0124] ρ 为桩基均匀介质的密度, kg/m^3 ;

[0125] c 为桩基均匀介质的比热, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$;

[0126] a 为介质的热扩散率, m^2/s ;

[0127] τ 为时间, s ;

[0128] τ' 表示瞬时热源释放的时间, s ;

[0129] r_0 为圆柱面热源 (螺旋管) 半径, m ;

[0130] θ 是过余温度, $^\circ\text{C}$ 。

[0131] 该无限长面热源产生的无量纲温度响应是一维的。定义无量纲距离 $Z' = z' / r_0$, 则无限多个连续发热的环形线热源所组成的圆柱型面热源产生的温度响应可以写作以下的无量纲形式:

[0132]

$$\Theta(R, Fo) = \frac{1}{8\pi^{2/3}} \int_0^{Fo} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{(Fo - Fo')^{3/2}} \exp \left[-\frac{R^2 + 1 + Z'^2}{4(Fo - Fo')} \right] I_0 \left[\frac{R}{2(Fo - Fo')} \right] dZ' dFo' \quad (6)$$

[0133] 热源 ($r = r_0$) 处的温升为:

$$[0134] \quad \Theta_0 = \frac{1}{8\pi^{2/3}} \int_0^{Fo} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{(Fo - Fo')^{3/2}} \exp \left[-\frac{2 + Z'^2}{4(Fo - Fo')} \right] I_0 \left[\frac{1}{2(Fo - Fo')} \right] dZ' dFo' \quad (7)$$

[0135] 式中,

[0136] Fo 为傅立叶数;

[0137] Z' 为圆环形线热源在纵向的无量纲坐标;

[0138] Fo' 为瞬时热源作用的时刻表示的傅立叶数;

[0139] R 为定义的无量纲半径;

[0140] r_0 为圆柱面热源 (螺旋管) 半径, m 。

[0141] 上面采用两种不同方法所得出的公式 (4) 和 (7) 是等价的, 但式 (7) 不如式 (4) 方便。

[0142] 通过软件编程计算分析, 得出所建立的实心圆柱面热源模型、空心圆柱面热源模型和线热源模型三种传热模型的温度响应比较曲线。从图中可以看出, 在傅立叶数 Fo 较小时, 即时间较短或面热源得半径 r_0 较大时, 三者的差别明显。实心圆柱面热源模型的温度响应曲线介于空心圆柱面热源模型和线热源模型的温度响应曲线之间。随着 Fo 的增大, 所建实心圆柱面热源模型和线热源模型的温度响应曲线逐渐逼近, 但始终低于空心圆柱面热源模型的温度响应曲线。

[0143] 对于桩基埋管地热换热器, 其径向的特征尺寸 r_0 要比钻孔的尺寸大得多。在相同时间时, 其傅立叶数要比钻孔埋管地热换热器的傅立叶数小得多。这也是钻孔埋管换热器可以用线热源模型或空心圆柱面模型来近似, 而桩基础螺旋管换热器一定要用新的实心圆

柱面模型进行分析的基本道理。而且从模型中可以看出,由于对应于相同的时间时桩基螺旋管换热器与钻孔埋管换热器相比其对应的 Fo 较低,因此无量纲温升较低。这表明同样深度的桩基螺旋管换热器比钻孔埋管换热器有更大的换热能力。计算结果还表明,较粗的桩基换热器承担短时间负荷的能力特别突出,因此它们对于负荷经常有剧烈变化的应用场合,例如办公楼、影剧院等的空调系统,将显现特别的优势。

[0144] 本发明的优点为:(1)以清洁、可再生的地下浅层地热资源为能源为地源热泵系统来提供能量,既可供热又可制冷,还可提供生活热水,具有地源热泵系统所具有的高效、节能、环保等优点。(2)充分利用建筑物的地下面积,减少了地源热泵地热换热器系统的占用地面面积。(3)通过桩基与周围大地形成换热,可以省去大量的钻孔和埋管费用,降低地源热泵系统的初投资。(4)在建筑物建造桩基时埋设螺旋管,这可以大大提高施工效率,施工也极为方便快捷。(5)提出了适合桩埋螺旋管地热换热器的传热模型,并给出了该模型的解析解。该模型可以成为桩埋螺旋管地热换热器传热分析的理论基础,并为工程设计提供了依据。

附图说明:

[0145] 图1是采用桩埋螺旋管为地热换热器的地源热泵系统示意图;

[0146] 图2是三种传热模型的温度响应曲线。

[0147] 图中,1. 地热换热器,2. 循环泵,3. 换热器 I,31. 换热器 II,4. 四通阀,5. 压缩机,6. 节流装置,7. 循环水泵,8. 向建筑物内的输送和末端系统。

具体实施方式:

[0148] 下面结合附图对本发明的具体实施作进一步的描述:

[0149] 如图1所示,本发明桩埋螺旋管式地源热泵系统包括桩埋螺旋管式的地热换热器系统、空调热泵系统、向建筑物内的输送和末端系统8。其中,地热换热器系统通过换热介质与空调热泵系统连接,空调热泵系统通过系统内的换热介质循环将地热换热器系统与向建筑物内的输送和末端系统连接。当地热换热器1不能承担空调全部负荷时,需要钻取地耦孔或其他方式作为冷热源补充。

[0150] 所述地热换热器系统由多个桩基螺旋管式的地热换热器1以串联和/或并联方式连接,再通过循环泵2使系统内的换热介质循环,在换热器I3中与空调热泵系统进行热量交换。地热换热器1内的螺旋管可以单螺旋、也可以双螺旋埋设在建筑物的桩基内。螺旋管的埋设方式是将螺旋盘管固定在建筑物地基的预制空心钢筋笼中,然后随钢筋笼一起下到桩井中,再浇注混凝土。

[0151] 空调热泵系统包括一对换热器I3、换热器II31、一个四通阀4、一个压缩机5和一个节流装置6;其中,换热器I3的壳程出入口与桩埋螺旋管地热换热器内的换热介质管路相连,换热器II31壳程出入口处分别与向建筑物内的输送用循环水泵7和接空调用户供回水干管的向建筑物内的输送和末端系统8相连。换热器I3、换热器II31的管程出入口与四通阀4、压缩机5和节流装置6相连构成了空调热泵系统。四通阀4和节流装置6分别安装在换热器I3、换热器II31间的管路上,其中四通阀4通过管路与压缩机5连接。

[0152] 向建筑物内的输送和末端系统在循环水泵7作用下将空调热泵系统提供的冷量

和热量传递给接空调用户供回水干管的向建筑物内的输送和末端系统 8。

[0153] 对于桩埋螺旋管地热换热器,采用实心圆柱面热源模型作为其传热模型。其数学描述为:

$$\left. \begin{aligned}
 & \frac{\partial \theta}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta}{\partial r} \right) + \frac{q_1 \delta(r-r_0)}{2\pi r_0 \rho c} & 0 < r < \infty, \tau > 0 \\
 & \theta = 0 & 0 < r < \infty, \tau = 0 \\
 & \frac{\partial \theta}{\partial r} = 0 & r = 0, \tau > 0 \\
 & \theta = 0 & r \rightarrow \infty, \tau > 0
 \end{aligned} \right\}$$

[0155] 式中

[0156] θ 是过余温度, $^{\circ}\text{C}$;

[0157] $\theta = t - t_w$;

[0158] t 是介质中的实际温度, $^{\circ}\text{C}$;

[0159] t_w 是介质的初始温度, $^{\circ}\text{C}$;

[0160] τ 为时间, s;

[0161] a 为介质的热扩散率, m^2/s ;

[0162] r 为空间点的径向坐标, m;

[0163] r_0 为圆柱面热源(螺旋管)半径, m;

[0164] q_1 为热流密度,表示每米深度桩的换热量, W/m;

[0165] ρ 为桩基均匀介质的密度, kg/m^3 ;

[0166] c 为桩基均匀介质的比热, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$;

[0167] $\delta(r-r_0)$ 为 Dirac- δ 函数,有 $\int_{-\infty}^{\infty} \delta(r-r_0) = 1$ 。

[0168] 通过格林函数法对该模型的求解有两种:

[0169] 1、当把圆柱面热源看作是沿圆周方向排列的无数线热源的集合时,对于圆柱径向坐标为 r 的点,对于半径为 r_0 的桩基,根据积分参数无量纲半径 $R = r/r_0$, 和无量纲时间傅立叶数 $Fo = a\tau/r_0^2$, 就可以表示出指数积分函数 $Ei(x)$ 的自变量 $-\frac{R^2+1-2R\cos\phi}{4Fo}$, 然后调

用适当的函数子程序可以将 $Ei\left(-\frac{R^2+1-2R\cos\phi}{4Fo}\right)$ 计算出。

[0170] 用数值积分方法可以计算得到圆柱面热源在离轴心距离为 r 的点引起的无量纲温度响应:

[0171]

$$\Theta(R, Fo) = -\frac{1}{4\pi^2} \int_0^\pi Ei\left(-\frac{R^2+1-2R\cos\phi}{4Fo}\right) d\phi$$

[0172] 式中,

[0173] Fo 为傅立叶数;

[0174] R 为无量纲半径;

[0175] ϕ 是柱坐标中的坐标参数,极角, rad(弧度),在公式中起积分变量的作用。

[0176] 同样地可以计算出在热源 $r = r_0$ 处的温升为:

[0177]

$$\Theta_0 = -\frac{1}{4\pi^2} \int_0^\pi \text{Ei} \left(-\frac{1 - \cos \varphi}{2Fo} \right) d\varphi$$

[0178] $= F(Fo)$

[0179] 式中,

[0180] Fo 为傅立叶数;[0181] φ 是柱坐标中的坐标参数, 极角, rad(弧度), 在公式中起积分变量的作用。

[0182] 2、当把一维实心圆柱面热源看作是沿高度方向排列的无数圆环形线热源的集合时, 对于径向坐标为 r 的空间点, 对于半径为 r_0 的桩基, 计算出其无量纲半径 $R = r/r_0$, 无量纲时间傅立叶数 $Fo = \alpha t/r_0^2$ 。以 Fo' 为积分参数, 则可以计算出零阶变形贝塞尔函数 $I_0(x)$ 的自变量 $\frac{R}{2(Fo - Fo')}$ 然后可以由自变量调用出其零阶变形贝塞尔函数 $I_0(x)$ 。按下式用数值积分方法可以计算得到任意坐标 R 和任意时刻 Fo 的无量纲温度响应:

$$[0183] \quad \Theta(R, Fo) = \frac{1}{8\pi^{2/3}} \int_0^{Fo} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{(Fo - Fo')^{3/2}} \exp \left[-\frac{R^2 + 1 + Z'^2}{4(Fo - Fo')} \right] I_0 \left[\frac{R}{2(Fo - Fo')} \right] dZ' dFo'$$

[0184] 式中, Fo 为傅立叶数;[0185] R 为定义的无量纲半径;[0186] Fo' 为瞬时热源作用的时刻表示的傅立叶数;[0187] Z' 为圆环形线热源在纵向的无量纲坐标;[0188] 同样地可以计算出在热源 $r = r_0$ 处的温升为:

$$[0189] \quad \Theta_0 = \frac{1}{8\pi^{2/3}} \int_0^{Fo} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{(Fo - Fo')^{3/2}} \exp \left[-\frac{2 + Z'^2}{4(Fo - Fo')} \right] I_0 \left[\frac{1}{2(Fo - Fo')} \right] dZ' dFo'$$

[0190] 式中, Fo 、 Fo' 、 Z' 的表示同上。[0191] 用两种方法计算出的热源 $r = r_0$ 处的温升是一样的。

[0192] 通过软件编程计算分析, 得出所建立的桩埋螺旋管地热换热器的实心圆柱面热源模型与空心圆柱面热源模型和线热源模型三种传热模型的温度响应比较曲线, 如图 2 所示。从图中可以看出, 实心圆柱面热源模型的温度响应曲线介于空心圆柱面热源模型和线热源模型的温度响应曲线之间; 随着时间的推移, 所建实心圆柱面热源模型的温度响应曲线逼近线热源模型的温度响应曲线。

[0193] 对于桩基埋管地热换热器, 在相同时间时其傅立叶数要比钻孔埋管地热换热器的傅立叶数小得多, 所得桩基壁面温度更贴近实际。而且经计算知与钻孔埋管换热器相比, 较粗的桩基换热器承担短时间负荷的能力特别突出, 因此它们对于负荷经常有剧烈变化的应用场合, 例如办公楼、影剧院等的空调系统, 将显现特别的优势。

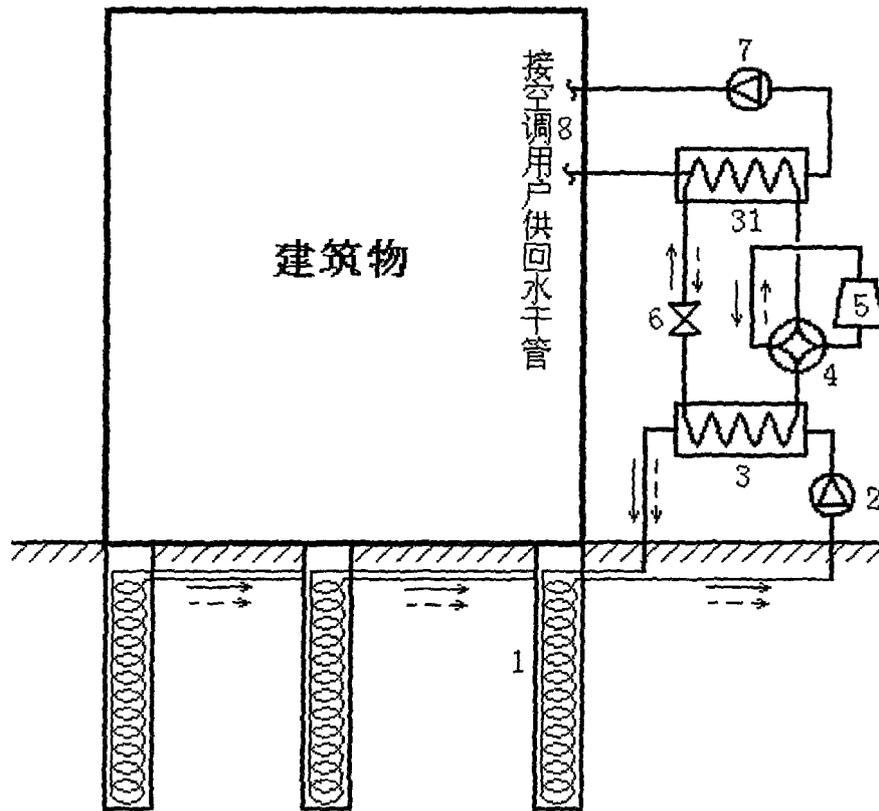


图 1

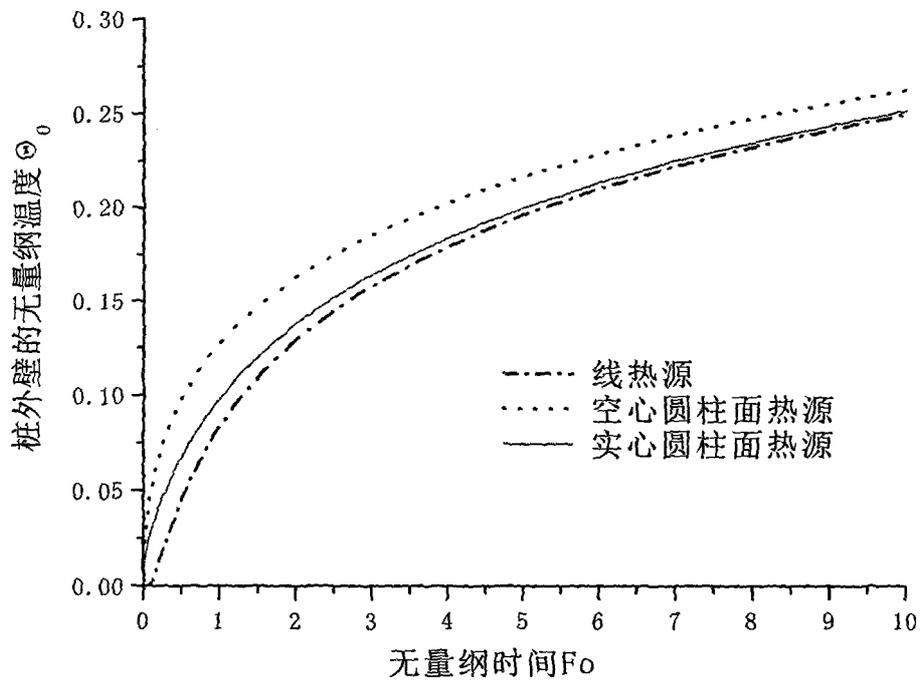


图 2